

非平衡プラズマジェットの磁場制御に関する研究

著者	佐藤 岳彦
号	1653
発行年	1994
URL	http://hdl.handle.net/10097/6926

氏 名	佐 藤 岳 彦
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	非平衡プラズマジェットの磁場制御に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 神山 新一
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 神山 新一 東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 南部 健一 東北大学助教授 西山 秀哉

論 文 内 容 要 旨

本論文では、非平衡プラズマジェットの磁場制御による工業的利用の拡大を目的にして、その基礎となる非平衡プラズマジェットの荷電粒子の諸特性や熱流体力学的特性への磁場の影響、またプラズマジェットの乱れへの磁場の影響を実験的に明らかにし、その両面から非平衡プラズマジェットの磁場制御機構を総合的に検討することにする。さらに、プラズマジェットにカリウムシードをした場合や、プラズマジェットが平板に衝突する場合での磁場制御特性を明らかにし、プラズマジェットの制御法として磁場制御が非常に有効であることを示す。本論文の要旨を各章ごと大別して列挙すると以下ようになる。

第 2 章 非平衡プラズマジェット基本特性の磁場制御

本章では、非平衡プラズマジェットの電子密度、電子温度、誘起電流、イオン速度、励起粒子温度、ガス温度、ガス速度などの基本特性値の分布への磁場の影響を明らかにし、磁場制御機構と熱伝達機構について検討を行った。

図 1 に実験装置の概略を示す。放電電流を 400A とし、そのアーク熱によりアルゴンガスを加熱し、860~900Pa に保たれた測定流路内にプラズマジェットを発生された。測定流路は内径 0.08m ステンレス管及び石英管を用いた。磁場は 2 つのソレノイドコイルにより最大軸方向磁束密度 $B_{zmax} = 0.44T$ のミラー磁場を発生させた。

図 2 に電子密度の平面分布の磁束密度による変化を示す。無磁場下で電子密度はコイル 1 の上流

側で最大値を有し、高密度領域は半径方向へ広がる。磁場下ではコイル1より上流のジェット外縁部の電子密度が急激に減少し、高密度領域は中心領域へ集束され下流に伸張する。

図3にログウスキーコイルに誘起された電流 I_{IP} の半径方向分布のコイル供給電流による変化を示す。 I_{IP} は中心で最大値を示し半径方向へ急激に減少する。 I_{IP} はコイル供給電流が増加すると中心領域で増大する。この周方向磁場の存在よりプラズマ中に電流が存在していることが明らかであり、無磁場下に比べ強磁場下の中心領域ではジュール加熱が増大しているものと考えられる。

磁場の作用を直接受ける荷電粒子の諸特性値は、プラズマジェット中心領域で磁場の拘束効果により著しく変化し制御が可能であることが示された。これらは、磁力線による半径方向への電子の熱拡散の抑制、ジュール加熱の増大、軸方向両極性拡散の増大などによると考えられる。一方、磁場の作用を荷電粒子との衝突過程を通して間接的に受けるガス温度やガス速度は、プラズマジェット中心で増大し管壁付近で減少する絞り効果が得られるが、その変化量はプラズマパラメータよりかなり小さい。

第3章 非平衡プラズマジェットの乱れの磁場制御

本章では、電子飽和電流やイオン飽和電流のパワースペクトルや乱れ強さ、連続写真によるジェットの変動、高温領域の変動への磁場の影響などを示した。

図4に中心軸上 $z=0\text{ m}$ での電子飽和電流のパワースペクトルの磁場による変化を示す。電子飽和電流のパワースペクトルは、磁場下と無磁場下で、乱流拡散が支配的な $-5/3$ 乗則領域と両極性拡散が支配的な $-13/3$ 乗則領域の分布範囲に大きな相違が見られる。無磁場下に比べ磁場下では、100Hz付近の低周波から2 KHzまで $-5/3$ 乗則領域が存在し、2 KHz以上の高周波で $-13/3$ 乗則領域に遷移する。また、全領域にわたりパワースペクトルは、磁場の印加により増大する。

図5にコイル1と2の間の赤外線画像によるプラズマジェットの高温領域の変動の大きさを示す。プラズマから放射された赤外線を測定光としているため、励起原子の発光強度の変動を表していると考えられる。高温領域の幅と長さの変動の大きさは、それぞれ磁場下で約倍増する。一方、プラズマジェットの中心軸位置の変動の大きさは、磁場下では約半減する。すなわち、プラズマジェットは磁場を印加することにより、ジェット中心部で乱れが急激に増大しジェットの中心軸位置の変動の振動振幅は小さくなる。

電子飽和電流と、イオン飽和電流の乱れ強さの半径方向分布やパワースペクトルは磁場下で相似性を示す。これは、電子とイオンの相互作用が極めて強くなり、軸方向への両極性拡散が増大することなどによると考えられる。また、磁場下でプラズマジェットの高温領域の長さや幅は変動が増大するが、中心軸位置の変動が小さくなり安定化することが示された。

第4章 シーディングによる磁場下の非平衡プラズマジェットの高機能化

本章では、プラズマジェットの電子温度、電子密度や熱伝導率や導電率の平面分布への磁場とカリウムシードの影響を示した。

図6にカリウムシード①無しの場合と②有りの場合の赤外線熱画像処置システムで測定した励起

原子温度の相対分布を示す。カリウムをシードするしないに関わらず、無磁場下よりも磁場下の方が、温度はジェット中心で高くなる。特に、シード有りの場合磁場により温度が急に上昇していることが分かる。これは、磁場下でシードをすることによりプラズマジェットの高活性化が容易にできることを示している。

プラズマジェットのプラズマパラメータや輸送係数は、磁場下でカリウムシーディングにより著しい増大が見られ、プラズマジェットの高機能化が可能であることが示された。また、電子密度は磁場よりもカリウムシーディングによる制御が容易であり、電子温度はカリウムシーディングよりも磁場による制御が容易であることが示された。

第5章 平板に衝突する非平衡プラズマジェットの磁場制御

本章では、平板近傍の電子密度、電子温度、ガス温度、軸方向全圧、熱流束、電子飽和電流およびイオン飽和電流のパワースペクトルと乱れ強さ、プラズマ電流応答特性、可視化画像などへの磁場の影響を明らかにすることにより、平板近傍の磁場制御機構の検討を行った。

図7に平板近傍の電子温度分布への磁場の影響を示す。無磁場下に比べ磁場下では、電子温度は $z = -2 \times 10^{-3} \text{m}$ で20,000Kの最大値を示し平板までのわずかな $2 \times 10^{-3} \text{m}$ の間に14,000Kまで急激に減少する。さらに半径方向への温度勾配も大きく $r = 0.02 \text{m}$ (上方) では、10,000K程度にまで減少する。

図8に平板上電圧印加位置の半径方向変化に対する中心軸上流におけるプラズマ電流の応答を示す。正電圧印加により、電子電流が平板上の電圧印加位置に依存せず急激に増大していることが分かる。これは電場が半径方向位置に関わらず中心領域に影響を与えることができることを示している。磁場下では中心付近での電場の影響が大きく、無磁場下の2倍以上のプラズマ電流が流れるが、中心から遠くなるに従って急激に減少し、管壁付近の電場は中心領域まで影響を及ぼさないことが示されている。

平板近傍のプラズマジェットの電子密度、電子温度や軸方向全圧、熱流束は磁場により衝突領域で増大する。また、平板近傍の可視化画像や平板上の相対温度分布から、磁場により衝突プラズマジェットが中心に集束され安定化することが示された。さらに、電子・イオン飽和電流のパワースペクトルから、電子やイオンはそれぞれ高周波領域と低周波領域で軸方向変化や磁場の影響を大きく受ける可能性が示され、平板上の荷電粒子の状態がある特定の周波数の変化に依存していることが示唆された。また、平板に電圧を印加することにより磁場下のプラズマ電流応答特性が大きく変化し、電磁場制御が極めて有望であることが示された。

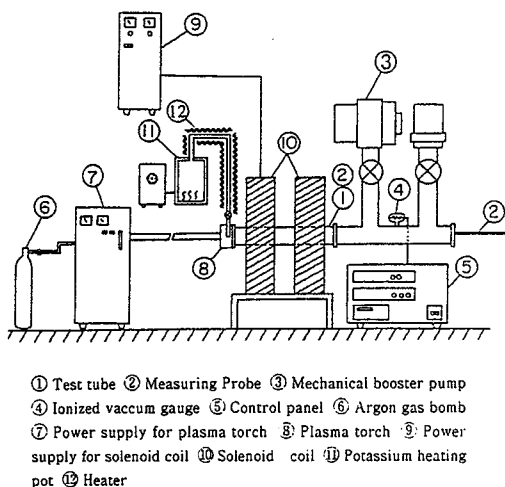


図1 実験装置概略図

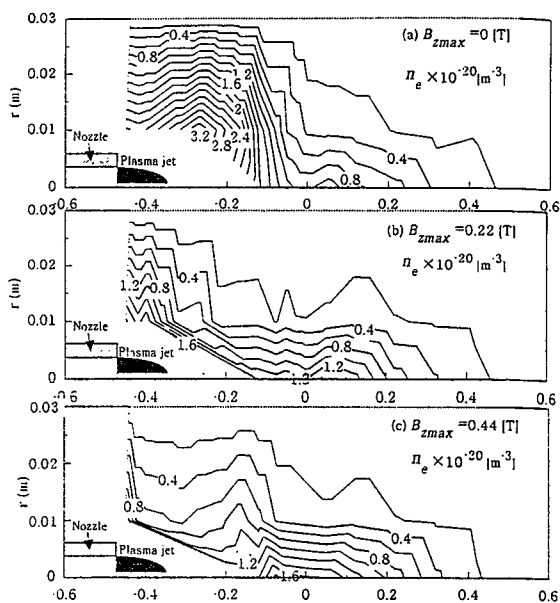


図2 電子密度の平面分布

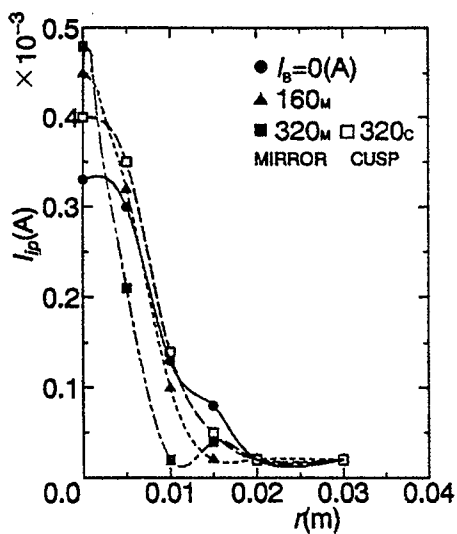


図3 ログウスキーコイルに誘起された電流の半径方向分布

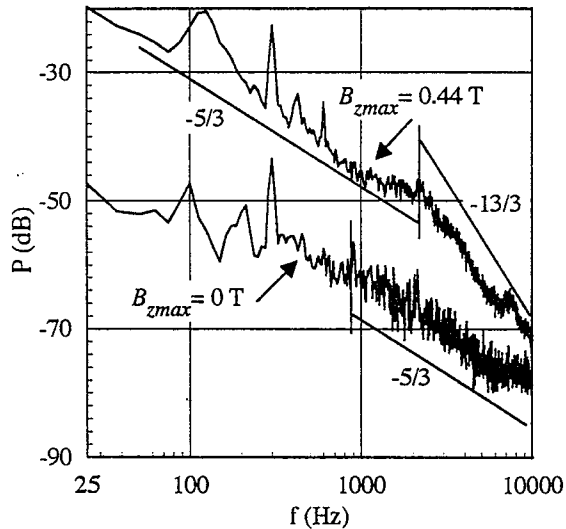


図4 電子飽和電流のパワースペクトルの磁場による変化

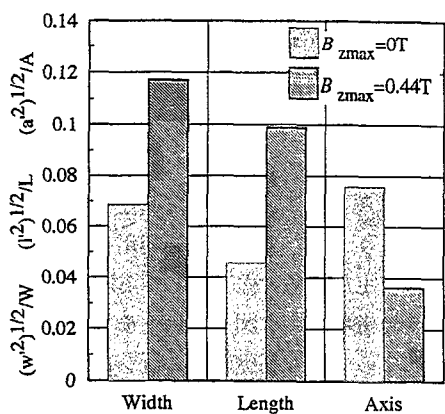
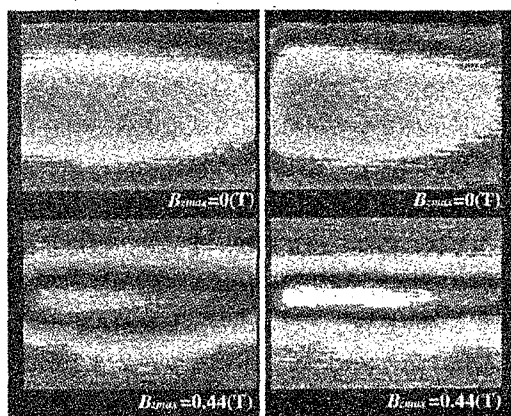


図5 プラズマジェットの高温領域の変動の大きさ



①シード無し ②シード有り
図6 波長 $1\ \mu\text{m}$ の赤外線測定光とする励起原子温度の相対分布

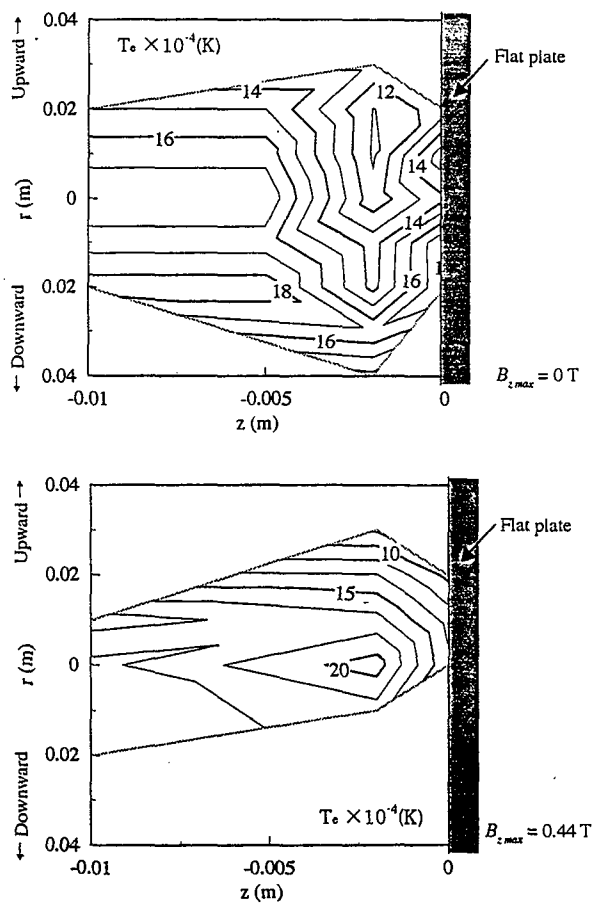


図7 平板近傍の電子温度分布への磁場の影響

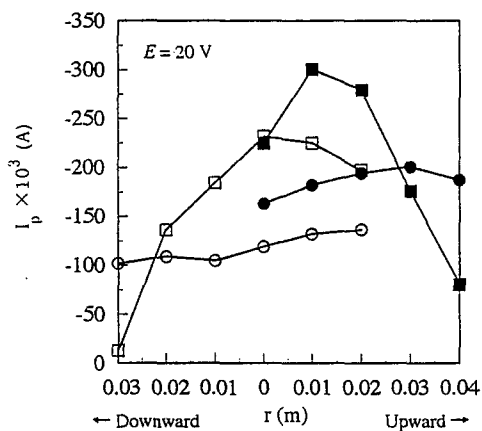


図8 平板上の電圧印加位置の半径方向変化に対する中心軸上流でのプラズマ電流応答特性 ($E=20\text{V}$) (横軸 r は電圧印加位置を表す。)

- $B_{zmax}=0\text{T}, z=0\text{m}$
- $B_{zmax}=0.44\text{T}, z=0\text{m}$
- $B_{zmax}=0\text{T}, z=-0.01\text{m}$
- $B_{zmax}=0.44\text{T}, z=-0.01\text{m}$

審 査 結 果 の 要 旨

非平衡プラズマジェットは、高エネルギー密度で、電磁流体力学的特性や化学的高活性を有する多機能流体として材料加工や表面改善、MHD 発電、プラズマ推進など工業的な応用分野での利用を目的に、その技術開発が活発に行われている。

非平衡プラズマジェットの工業的利用の拡大にともない、プラズマジェットの制御技術の向上が放電ガスの条件、流路形状、電極間距離などを変えることにより、また、電磁場を利用して行われている。特に、電磁場印加による制御はプラズマを清浄で、安定な状態を保ち、しかも容易に制御できる利点を有している。しかしながら、プラズマジェットの磁場制御に関しては、その制御機構を解明するためのジェットのマクロ及びミクロな特性についての十分な基礎研究が行われているとは言い難いのが現状である。

本研究は、非平衡プラズマジェットの磁場制御法の確立を目的に、その基礎研究として、プラズマジェットの荷電粒子の振る舞いや熱流体力学的特性への磁場の影響を実験的に解明したもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、非平衡プラズマジェットの基本特性の磁場制御に関する実験的な検討を行い、プラズマパラメータを支配する電子密度や電子温度は、ジェットの中心領域で磁場の拘束効果により著しく変化し、磁場による直接的な制御効果があることを明らかにしている。一方、マクロな熱流体力学的特性としてのガス温度やガス速度は中心部で増大し、管壁近傍で減少する、いわゆる絞り効果はあるものの、その変化量は電子温度や電子密度の場合に比べて微小であることを示している。これは有用な知見である。

第3章では、非平衡プラズマジェットの乱れへの磁場の影響をイオン及び電子の飽和電流の乱れ強さの測定により検討し、それらの半径方向分布やパワースペクトルは磁場の作用下で相似性を示すこと、また、プラズマジェットの高温領域の長さや幅は変動が増大するが、中心軸の変動は減少し、安定化することを明らかにしている。

第4章では、アルゴンプラズマ中へ微量のカリウムをシードすることにより、プラズマ特性の高機能化が可能であることを示している。さらに、シーディングの効果と磁場作用の効果を詳細に比較検討して、その相乗効果の有用性を明らかにしている。これは重要な成果である。

第5章では、平板に衝突するプラズマジェットの基本特性に及ぼす磁場印加の影響を検討し、平板近傍の電子密度、電子温度、軸方向全圧及び熱流束は、磁場に作用により衝突領域で増大すること、また、衝突プラズマジェットが磁場の作用で中心部に集束され、安定化することを明らかにしている。さらに、平板上に局所的に電圧を印加することにより、より効果的な制御が可能であることを明らかにしている。これは有用な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、非平衡プラズマジェットの磁場制御に関する実験的な検討を行い、非平衡プラズマジェットの基本特性に及ぼす磁場の影響を明らかにしたもので、流体力学の寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。